

Alfredo Roca

Control automático de procesos industriales

**Con prácticas de
simulación y análisis
por ordenador PC**

Segunda edición



Madrid • Buenos Aires • México • Bogotá

© Alfredo Roca Cusidó, 2023 (2ª edición)
1ª ed., 2014

www.alfredoroca.com
www.alfredoroca.com/libro.htm

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos
Internet: <http://www.editdiazdesantos.com>
E-mail: ediciones@editdiazdesantos.com

ISBN: 978-84-9052-511-1
Depósito Legal: M-29553-2023

Diseño de cubierta y Fotocomposición: Alfredo Roca
Printed in Spain - Impreso en España

ÍNDICE

1	Introducción	1
1.1	Concepto de sistema	1
1.2	Concepto de bloque	1
1.3	Diagrama de bloques	2
1.4	Función de transferencia o transmitancia	2
1.5	Sistema controlado	5
1.6	Control manual en lazo cerrado	5
1.7	Control automático en lazo cerrado	6
1.8	Cambios de carga y perturbaciones	7
1.9	Realimentación	8
1.10	Álgebra de bloques	9
1.10.1	Reglas algebraicas	10
2	La transformada de Laplace	17
2.1	Qué es y para qué sirve	17
2.2	Propiedades y teoremas de la transformada de Laplace	18
2.2.1	Enumeración de las propiedades y teoremas	19
2.2.2	Aplicación del teorema de la derivación real	23
2.2.3	Antitransformada de fracciones impropias	26
2.3	Transmitancia operacional	27
2.4	Transformación de ecuaciones diferenciales	30
2.5	Ejemplos de cálculo	33
2.5.1	Cálculo con condiciones iniciales	35
2.6	Conversión de una función laplaciana en una ecuación diferencial	37

3	Variables y parámetros	39
3.1	Es necesario tipificar	39
3.2	Variables	40
	Potencial o fuerza impulsora	40
	Flujo o corriente	40
	Carga o cantidad	40
3.3	Parámetros	41
	Resistencia y conductancia	42
	Capacidad	43
	Inertancia	44
3.4	Analogías	47
4	Elementos básicos	51
4.1	Formas o funciones elementales de excitación	51
	4.1.1 Escalón unitario	51
	4.1.2 Impulso unitario	53
	4.1.3 Rampa unitaria	54
	4.1.4 Función senoidal	54
4.2	Componentes básicos de un sistema controlado	54
	4.2.1 Componentes activos	55
	4.2.2 Elementos de primer orden	56
	4.2.3 Retardo de primer orden resistencia-capacidad	56
	4.2.4 Retardo de primer orden resistencia-inertancia	59
	4.2.5 Estudio de elementos retardo de primer orden. Metodología de cálculo	62
	4.2.5.a Filtro o elemento R-C (resistencia-capacidad)	63
	4.2.5.b Elemento bulbo de temperatura	64
	4.2.5.c Concentración en un tanque agitado	66
	4.2.5.d Temperatura en un tanque agitado	68
	4.2.5.e Reacción de primer orden	69
	4.2.5.f Nivel de un tanque con restricción de descarga. Linealización de funciones de nivel	71
	4.2.5.g Recipiente con gas a presión provisto de una restricción. Linealización de funciones de sistemas con gases a presión	76
	4.2.5.h Recipiente con gas a presión con dos restricciones .	80
	4.2.6 Elemento capacidad pura o integrador	84
	4.2.6.a Nivel en tanque con salida constante	85
	4.2.6.b Masa aislada provista de caldeo eléctrico	87
	4.2.6.c Pistón hidráulico	88

4.2.7	Elementos ajustables	89
4.2.7.a	Ganancia ajustable. Multiplicador	90
4.2.7.b	Reostato o potenciómetro	91
4.2.7.c	Válvula de control	92
4.2.7.d	Bomba centrífuga	97
4.2.8	Elementos de segundo orden	102
4.2.8.a	Circuito eléctrico R-L-C serie	104
4.2.8.b	Masa suspendida de un resorte con amortiguación	107
4.2.8.c	Sismógrafo	110
4.2.8.d	Acelerómetro	113
4.2.8.e	Dos retardos de primer orden en serie	115
4.2.8.f	Dos sistemas de nivel conectados en serie	117
4.2.8.g	Dos filtros R-C conectados en serie	120
4.2.8.h	Bulbo de temperatura con vaina	121
4.2.8.i	Tanque encamisado	124
4.2.8.j	Dos tanques a presión en serie	127
4.2.9	Elemento tiempo muerto	127
4.2.10	Elemento adelanto-retardo	130
4.2.11	Elemento anticipativo	132
4.2.12	Controladores	136
4.2.12.a	Proporcional (P)	136
	Banda proporcional	137
	Ganancia	138
	Desviación permanente	138
	Reajuste manual	138
	Ecuación del controlador	143
4.2.12.b	Integral (I)	144
	Ecuación del controlador	144
	Transmitancia operacional	146
4.2.12.c	Proporcional-integral (PI)	147
	Acción integral (Reset)	147
	Velocidad de reajuste	147
	Repeticiones por minuto	147
	Tiempo integral	148
	Ecuación del controlador	148
4.2.12.d	Proporcional-derivativo (PD)	149
	Acción derivativa (Rate)	149
	Tiempo derivativo	150
	Ecuación del controlador	150
4.2.12.e	Proporcional-integral-derivativo (PID)	150
	Ecuación del controlador	151
	Transmitancia operacional	151
	Ejecuciones especiales	153
	Nota sobre la señal de error o desviación	155

5	Respuesta temporal de los componentes básicos	157
5.1	Sistemática de cálculo	157
5.1.1	Respuesta al impulso	158
5.1.2	Respuesta al escalón unitario	159
5.1.3	Respuesta a la rampa unitaria	160
5.2	Respuesta de un retardo de primer orden	160
5.2.1	Respuesta indicial	161
	Práctica nº 5.1	167
	Práctica nº 5.2	168
5.2.2	Respuesta impulsiva	169
	Práctica nº 5.3	172
	Práctica nº 5.4	173
5.2.3	Respuesta a la rampa	174
	Práctica nº 5.5	177
5.3	Respuesta de un retardo de segundo orden	178
5.3.1	Respuesta indicial	179
	Caso subamortiguado	179
	Caso oscilatorio puro	182
	Caso sobreamortiguado	183
	Caso críticamente amortiguado	184
	Práctica nº 5.6	185
	Práctica nº 5.7	186
	Práctica nº 5.8	186
5.3.2	Respuesta impulsiva	187
	Caso subamortiguado	188
	Caso oscilatorio puro	188
	Caso sobreamortiguado	189
	Caso críticamente amortiguado	189
	Práctica nº 5.9	190
5.3.3	Respuesta a la rampa	190
	Caso subamortiguado	191
	Caso oscilatorio puro	195
	Caso sobreamortiguado	195
	Caso críticamente amortiguado	196
	Práctica nº 5.10	196
5.4	Respuesta de un bloque tiempo muerto	197
	Práctica nº 5.11	197
5.5	Respuesta de un bloque adelanto-retardo	198
5.5.1	Respuesta indicial	198
	Caso adelanto	199
	Caso retardo	199
	Práctica nº 5.12	200
	Práctica nº 5.13	201

5.5.2	Respuesta impulsiva	202
	Práctica n° 5.14	202
5.5.3	Respuesta a la rampa	203
	Práctica n° 5.15	205
5.6	Respuesta de un bloque anticipativo	206
5.6.1	Respuesta indicial	206
5.6.2	Respuesta impulsiva	206
5.6.3	Respuesta a la rampa	207
	Práctica n° 5.16	208
5.7	Respuesta de un controlador P+D	208
5.7.1	Respuesta indicial	209
5.7.2	Respuesta a la rampa	210
	Práctica n° 5.17	212
5.8	Respuesta de un controlador P+I	212
5.8.1	Respuesta indicial	213
	Práctica n° 5.18	214
5.8.2	Respuesta a la rampa	215
	Práctica n° 5.19	216
5.9	Respuesta de un controlador P+I+D	217
5.9.1	Respuesta indicial	218
5.9.2	Respuesta a la rampa	219
	Práctica n° 5.20	220
5.10	Respuesta de un controlador integral	221
	Nota sobre representación gráfica de impulsos	222
6	Respuesta frecuencial de los componentes básicos	223
6.1	Conceptos de base	223
6.1.1	El decibelio	224
6.1.2	La octava y la década	226
6.1.3	Las unidades dB/octava y dB/década	227
6.1.4	Números complejos y vectores	228
	Números complejos conjugados	232
	Operaciones con números complejos	233
6.1.5	Vectores giratorios (fasores). Ondas senoidales	237
6.2	Respuesta frecuencial	241
6.2.1	Obtención de la respuesta frecuencial	244
6.3	Tipos de representaciones gráficas	246
6.3.1	Diagrama de Bode	246
6.3.2	Diagrama de Nyquist	248
6.3.3	Diagrama de Black	249

6.4	Determinación de la respuesta frecuencial	250
6.4.1	Módulo K o constante K	250
6.4.2	Factores del tipo s	252
6.4.3	Factores del tipo $Ts+1$	254
	Práctica nº 6.1	263
6.4.4	Factores del tipo $T^2s^2+2\zeta Ts+1$	265
	Práctica nº 6.2	276
	Práctica nº 6.3	278
	Práctica nº 6.4	279
6.4.5	Factores del tipo e^{-Ts}	280
	Práctica nº 6.5	281
6.4.6	Elemento adelanto-retardo	282
	Práctica nº 6.6	286
	Práctica nº 6.7	286
6.4.7	Elemento anticipativo	287
	Práctica nº 6.8	289
6.4.8	Controlador P	290
6.4.9	Controlador P+D	290
	Práctica nº 6.9	293
6.4.10	Controlador P+I	294
	Práctica nº 6.10	296
6.4.11	Controlador P+I+D	297
	Práctica nº 6.11	302
	Práctica nº 6.12	303
	Práctica nº 6.13	305
6.4.12	Controlador integral	306
7	Control automático en lazo cerrado	309
7.1	Realimentación	309
7.2	Concepto de estabilidad	309
7.3	Criterios de optimización	311
7.4	Respuesta frecuencial y estabilidad	316
7.5	Margen de ganancia y margen de fase.	
	Estabilidad relativa	319
	7.5.1 Margen de ganancia	320
	7.5.2 Margen de fase	321
	7.5.3 Estabilidad relativa	322
7.6	Interpretación gráfica de los márgenes	
	de ganancia y de fase	322
	7.6.1 Ejemplo de cálculo de los márgenes	
	de ganancia y de fase	324

7.7	Criterios de estabilidad	326
7.7.1	Criterio de estabilidad de Nyquist	329
7.7.2	Criterio de estabilidad de Bode	330
7.7.3	Ampliación del criterio de estabilidad de Nyquist	330
7.8	Respuesta frecuencial en lazo cerrado	337
7.9	Manejo de las perturbaciones	342
7.10	Estrategias de control	347
8	Control en lazo cerrado simple	349
8.1	Aplicación	349
8.2	Diagrama de bloques	349
	Práctica n° 8.1	351
8.3	Simulación y análisis de sistemas controlados	351
8.3.1	Respuesta generalizada de un lazo con perturbación	352
	Generalización de las funciones de transferencia en lazo cerrado	356
8.3.2	Control proporcional de un proceso retardo de primer orden	357
	Respuesta frente a cambios en el punto de consigna	358
	Práctica n° 8.2	361
	Respuesta frente a perturbaciones	365
	Práctica n° 8.3	366
8.3.3	Control proporcional de un proceso formado por dos retardos de primer orden	367
	Respuesta frente a cambios en el punto de consigna	368
	Práctica n° 8.4	371
	Respuesta frente a perturbaciones	373
	Práctica n° 8.5	376
	Práctica n° 8.6	377
8.3.4	Control proporcional de un proceso formado por tres retardos de primer orden	379
	Práctica n° 8.7	382
8.3.5	Control en modo integral de un proceso formado por un retardo de primer orden	389
	Práctica n° 8.8	391
8.3.6	Control proporcional-integral de un proceso formado por un retardo de primer orden	393
	Práctica n° 8.9	394
8.3.7	Control proporcional-integral de un proceso formado por dos retardos de primer orden	395
	Práctica n° 8.10	397
8.3.8	Control proporcional-integral de un proceso formado por tres retardos de primer orden	401
	Práctica n° 8.11	403

8.3.9	Control proporcional-integral-derivativo de un proceso formado por dos retardos de primer orden	406
	Práctica nº 8.12	409
8.4	Efecto de un retardo de tiempo en la medida	410
	Práctica nº 8.13	414
8.5	Efecto de un tiempo muerto en un sistema	416
8.5.1	Efecto del tiempo muerto en la medida	416
	Práctica nº 8.14	418
8.5.2	Efecto del tiempo muerto en el proceso	420
	Práctica nº 8.15	421
8.5.3	Mejoras que aporta la acción derivativa	423
	Práctica nº 8.16	424
	Práctica nº 8.17	425
8.6	Efecto de las alinealidades en un sistema	426
	Práctica nº 8.18	428
9	Controles complejos en lazo cerrado	433
9.1	Control en cascada	433
	Práctica nº 9.1	441
	Práctica nº 9.2	447
	Práctica nº 9.3	474
9.1.1	Predicción de la desviación permanente	478
9.2	Control en adelanto	482
9.2.1	Ecuaciones del control en adelanto	484
	Práctica nº 9.4	495
	Práctica nº 9.5	503
 Apéndices		
A-1	Tabla de transformadas de Laplace	519
A-2	Escalado de procesos y normalización de variables para el ordenador	529
1	Introducción	529
2	Márgenes de operación	529

3	Normalización de variables	530
4	Escalado del tiempo	535
5	Resumen	537
6	Manejo de los parámetros “Valor de base B_e y B_s ”	539
7	Manejo del parámetro “Elevac./Supres. de cero Z ”	549
8	Manejo del parámetro “Valor de referencia R ”	552
A-3	Composición de la respuesta temporal de un sistema	555
A-4	Regla de Mason para el cálculo de la transmitancia entre dos puntos de un sistema	565
A-5	Bibliografía	575
 Anexo 1		
	Guía de manejo del programa	579
1	Requisitos para uso del programa	579
1.1	Se requiere	579
1.2	Notas sobre la resolución de pantalla	579
2	Instalación del programa	580
2.1	Obtención del fichero para la instalación	580
2.2	Modos de instalación	580
2.2.1	Instalación manual	580
2.2.2	Instalación automática	580
2.3	Uso del programa	580
3	Arranque del programa	581

4	Menú principal de Windows	582
	Estructura de los menús	582
5	Descripción de las principales opciones	584
5.1	Análisis de componentes básicos	584
5.2	Simulación de lazos de control	584
5.3	Menús de opciones	584
5.3.1	Menú Frecuencial	585
	• Diagrama Real	585
	• Diagrama de Bode	585
	• Diagrama de Nyquist	585
	• Diagrama de Black	585
	• Todos los diagramas	586
	• Marcas de frecuencia	586
	• Frecuencia crítica (resonancia)	586
	• Frecuencia de cruce de ganancia	586
	• Frecuencia de pico de resonancia	586
5.3.2	Menú Temporal	587
	a) Para <i>Componentes básicos</i>	587
	• Impulso	587
	• Escalón	587
	• Rampa	587
	b) Para <i>Lazos de control</i>	587
	• Escalón condiciones iniciales	588
	• Rampas programadas	588
5.3.3	Menú Cambios	588
	• Parámetros del componente	589
	• Límites de las escalas de frecuencia	589
	• Duración de la respuesta temporal	589
	• Constantes (<i>Componentes básicos</i>)	589
	• Programación de las rampas (<i>Lazos de control</i>)	589
	• Modos (<i>Lazos de control</i>)	590
	a) <i>Modo del lazo en la respuesta frecuencial</i>	590
	b) <i>Modo de presentación de la respuesta temporal</i>	591
	• Frecuencia de muestreo (<i>Lazos de control</i>)	592
5.3.4	Menú Miscelán	593
	• Borrar pantalla	593
	• Vista anterior	593
	• Ver Diagrama de bloques	593
	• Ver parámetros de los bloques activos (<i>Lazos de c.</i>)	594
	• Hacer nulos los bloques (<i>Lazos de control</i>)	594

5.4	Otros menús	594
5.4.1	Menú Archivo	595
	• Imprimir	595
	• Preferencias	595
5.4.2	Menú Menú general	596
5.4.3	Menús especiales	596
	• Cambios > Color de fondo	596
	• Miscelán > Calculador ABACUS	596
	• Miscelán > Calculadora de Windows	597
	• Miscelán > Preferencias de trabajo	597
5.4.4	Menú Información	597
5.4.5	Menús redundantes	597
5.4.6	Otras opciones en la ejecución de una <i>Respuesta temporal</i>	598
6	Control de errores	599
7	Ficheros del programa	600
7.1	Ficheros generados en la instalación	600
7.2	Ficheros generados por el usuario	600
8	Misceláneos.	
	Peculiaridades de un programa de simulación	601
8.1	Generalidades	601
8.2	Tiempo muerto virtual oculto en el sistema	602
8.3	El problema de las variables discontinuas	603
	¡PRECAUCIÓN!	604

Nota:

El fichero conteniendo exclusivamente la **Guía de manejo del programa**, en los formatos Word y PDF, puede descargarse en la dirección:

https://www.alfredoroca.com/index.php#guia_prog

INTRODUCCIÓN

1.1 Concepto de sistema

Un *sistema* es un conjunto de elementos, interrelacionados entre sí, los cuales se caracterizan por poseer unos parámetros inherentes que los definen, y por mostrar unas condiciones físicas asociadas, susceptibles de evolucionar con el tiempo.

Los parámetros característicos, específicos de cada elemento, son considerados normalmente constantes e invariables con el tiempo y se les denomina *parámetros del sistema*.

Las condiciones físicas de cada componente, cambiantes con el tiempo, determinan el estado del sistema en todo momento, y se expresan mediante las denominadas *variables del sistema*. Sus magnitudes y su evolución vienen regidas por leyes específicas, en función del tiempo, de la configuración de los componentes y de los parámetros de los mismos.

1.2 Concepto de bloque

En Teoría de control, cada uno de los componentes elementales o básicos en que puede descomponerse un sistema, constituye un *bloque*. Asimismo, un conjunto de bloques contiguos puede reagruparse formando un único bloque.

Un bloque puede representarse gráficamente por un rectángulo, con una flecha de entrada y otra de salida, las cuales significarán las señales de entrada y salida, respectivamente, a dicho bloque (fig. 1.1).

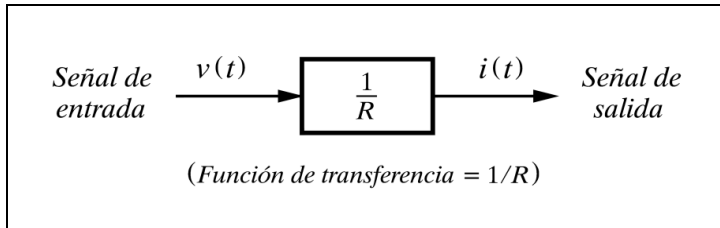


Fig. 1.1 Representación gráfica de un bloque

La *señal de entrada* corresponderá a una variable física, o *variable de entrada*, la cual será convertida o manipulada por el bloque, proporcionando o generando, como resultado, una *señal de salida*, es decir, la *variable de salida*.

La forma como se realiza esta conversión depende de las características específicas del bloque, y será representada por una ecuación matemática, denominada *función de transferencia*, que podrá ser inscrita en el rectángulo.

La entrada es la causa, la excitación, la acción o el estímulo que actúan sobre el bloque; mientras que la salida es el efecto, la respuesta, la reacción o la consecuencia de aquella entrada sobre el bloque representado por la función de transferencia.

1.3 Diagrama de bloques

La representación gráfica del conjunto de bloques que componen un sistema formará el *diagrama de bloques*. Los bloques se unen mediante líneas, que con sus flechas señalan la dirección del flujo de información o señales que circulan a lo largo del sistema (fig. 1.3, pág. 7).

La adición algebraica o comparación de señales se representará por un pequeño círculo o sumatorio, y se anotará junto a cada señal de entrada el signo con el que se halle operando.

Un diagrama de bloques es una forma convencional de representar gráficamente las interrelaciones entre las variables significativas del sistema, así como las características (parámetros) de los componentes que lo forman.

1.4 Función de transferencia o transmitancia

Toda variable que evoluciona con el tiempo siguiendo una determinada ley, podrá ser representada por una ecuación matemática en función de una serie de *parámetros* y de la variable *tiempo*; es decir, por una *función temporal*.

La expresión o ecuación matemática que, en un bloque, relaciona la variable de salida con la de entrada, se denomina *función de transferencia* o también *transmitancia* del bloque. Ésta será, por tanto, el cociente entre la función temporal de la salida y la de la entrada. La transmitancia no es más que un modelo matemático representativo del comportamiento dinámico de un componente, frente a una señal de entrada.

Un sencillo ejemplo de función de transferencia puede ser la de un bloque constituido por una resistencia eléctrica (resistor). Podemos definir como variable de entrada la tensión en bornes de este resistor, y como variable de salida la intensidad que circulará por el mismo.

Escribiremos

$$i(t) = \frac{v(t)}{R}$$

en donde la notación (t) significa que las variables que la contienen son temporales, es decir, que varían con el tiempo. Vemos que R , la resistencia eléctrica del elemento, no es una función temporal, pues, en efecto, no es una variable sino un parámetro constante en el tiempo. Este parámetro define precisamente el componente en cuestión y, por tanto, su comportamiento o respuesta frente a determinada entrada.

La función de transferencia del bloque será, según se ha dicho, la razón entre las funciones de entrada y salida. Llamando $G(t)$ a esta función, se tendrá

$$G(t) = \frac{i(t)}{v(t)} = \frac{1}{R}$$

es decir, la inversa de la resistencia o, lo que es lo mismo, la conductancia del resistor.

Veamos ahora cómo se aplica, de un modo general, el conocimiento de la transmitancia de un bloque para calcular la salida, dada una determinada entrada.

La salida (respuesta), será el resultado de multiplicar la transmitancia por la entrada (excitación), esto es,

$$i(t) = G(t) v(t)$$

Supongamos que la tensión de entrada obedece a una función del tipo

$$v(t) = A \operatorname{sen} \omega t$$

entonces

$$i(t) = \frac{1}{R} A \operatorname{sen} \omega t$$

Es preciso aclarar que la definición que se ha dado de transmitancia, basada en la relación de funciones temporales, sólo es práctica en caso de relaciones sencillas, como la que hemos visto en el ejemplo. Cuando las señales de entrada y salida están relacionadas por una ecuación íntegrodiferencial, es poco práctico tratar de establecer la función de transmitancia del modo indicado, y el rigor matemático nos obligaría a definiciones complejas y operaciones engorrosas, fuera del alcance de este libro, y, sobre todo, carentes de interés. Porque, como se verá en el capítulo siguiente, al estudiar la transformada de Laplace, estos conceptos se manejan de forma sorprendentemente sencilla. Lo que se ha pretendido hasta aquí es dar una visión anticipada del concepto transmitancia, dada su implicación con los diagramas de bloques.

Lo importante es percatarse de que un bloque puede significar cualquier elemento, componente, dispositivo o sistema, capaz de responder de una forma característica frente a una determinada excitación, y esta forma queda definida precisamente por la transmitancia del bloque. Asimismo, un conjunto de bloques concatenados puede reagruparse para formar un solo bloque, reuniendo entonces las características de cada uno de los bloques que lo forman.

Tomemos los siguientes dos ejemplos, bien dispares entre sí, basados en el esquema general:

$$\text{Entrada} \Rightarrow [\text{Bloque (Transmitancia)}] \Rightarrow \text{Salida}$$

- Una masa responde con una aceleración cuando se le aplica una fuerza. Aquí la entrada es la *fuerza*, la transmitancia dependerá de la *masa*, y la salida será la *aceleración* (o la velocidad, o la distancia recorrida), sin menoscabo de que la fuerza sea una variable cambiante con el tiempo.
- Un horno por el que circula un producto químico para su calentamiento, responderá con una temperatura de salida de este producto, en función del caudal de combustible que le sea suministrado. En este caso el *caudal de combustible* será la entrada, la *temperatura de producto* la salida, mientras que la transmitancia dependería del diseño del *horno*, de las características del producto, de las del combustible, etc.

Es cierto que en este último ejemplo la temperatura de salida podrá depender en la práctica de otros factores, cambiantes con el tiempo, tales como el caudal y la temperatura inicial del producto a calentar, la calidad del combustible, la temperatura ambiente, etc., pero ello será objeto de estudio detallado más adelante.

1.5 Sistema controlado

Un *proceso* es un conjunto de equipos o dispositivos, ya sean mecánicos, eléctricos, electrónicos, informáticos, neumáticos, hidráulicos, físicos, químicos, térmicos, o de cualquier otra índole, dispuestos de tal modo que en conjunto puedan realizar las operaciones necesarias con el fin de lograr un determinado objetivo.

Un ejemplo de proceso podría ser el horno para calentamiento, citado anteriormente, en el que el objetivo final sería conseguir mantener constante, en un valor prefijado, la temperatura del fluido circulante a la salida.

Pero para conseguir este objetivo es evidente que son precisos una serie de dispositivos adicionales, que de alguna manera lleven a cabo el control o regulación del proceso.

Estos dispositivos reciben el nombre de *sistema de control*.

Se denomina *sistema controlado* al conjunto formado por el proceso y el sistema de control.

En este ejemplo, será necesario, como mínimo, disponer de una información continua de la temperatura que se está controlando y de un dispositivo capaz de modificar o ajustar el caudal de aportación de combustible. Prácticamente hablando, de un termómetro situado en la tubería de salida de producto y de una válvula situada en la tubería de aporte de combustible al horno.

1.6 Control manual en lazo cerrado

Con el montaje descrito podríamos intentar ya efectuar un *control manual* del proceso, operando del siguiente modo:

Según que la temperatura indicada por el termómetro (TI) esté por debajo o por encima del valor deseado, abriríamos o cerraríamos, respectivamente (en mayor o menor medida, según la diferencia observada), la válvula de aportación de combustible, a efectos de corregir el caudal aportado. A continuación, esperaríamos hasta poder evaluar el efecto producido en el proceso por tal corrección, y obraríamos en consecuencia, ajustando nuevamente la apertura de la válvula, hasta conseguir establecer la temperatura en el valor deseado (fig. 1.2).

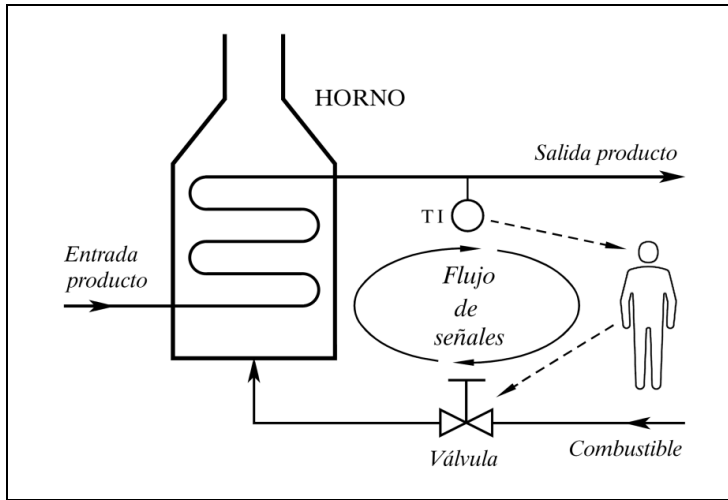
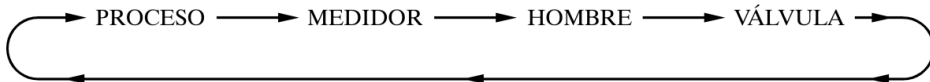


Fig. 1.2 Control manual en lazo cerrado

Vemos que el flujo de información que se efectúa en el control de este proceso, circula cerrándose sobre sí mismo a través del ser humano, siguiendo la secuencia cerrada siguiente:



sin que pueda decirse cuál de estos componentes está en primer lugar. Forman un anillo o *control en lazo cerrado*, sin principio ni fin.

1.7 Control automático en lazo cerrado

El modo de regulación manual descrito en el apartado anterior tiene, como es obvio, numerosos inconvenientes. El principal es que precisa la atención permanente humana, lo que hace que sea costoso. Otros inconvenientes, en general, derivados del ya citado, son que es lento, inseguro y poco preciso. Es de destacar el riesgo que pueda comportar una eventual distracción humana, por ejemplo, por fatiga.

La *regulación o control automático en lazo cerrado* consiste en sustituir la acción del elemento humano por un dispositivo llamado *controlador* o *regulador*, el cual gobierna el *elemento final de regulación*, normalmente una *válvula de control*, a efectos de corregir la *variable manipulada* de entrada al proceso.

El conjunto que forman los componentes que llevarán a cabo el control automático de un proceso se llama *sistema de control automático*.

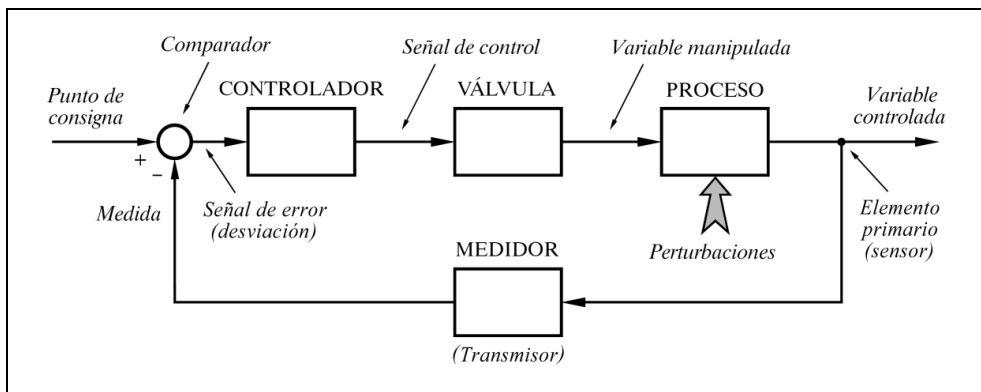


Fig. 1.3 Disposición básica de un proceso controlado automáticamente

La figura 1.3 muestra un diagrama de bloques de la disposición básica de los componentes que forman un proceso con control automático en lazo cerrado. Obsérvese que el flujo de señales se cierra sobre sí mismo, y que el sistema tiene como señal de entrada el *punto de consigna* (también llamado *valor deseado* o *set point* en inglés) y como señal de salida la *variable controlada*.

El dispositivo *comparador* entre las señales de consigna y medida, generador de la *señal de error* o *desviación*, suele formar parte del controlador.

1.8 Cambios de carga y perturbaciones

El controlador actúa continuamente para corregir los efectos de desajuste que producen en la regulación los cambios inevitables a los que el proceso está sometido. Estos cambios pueden ser de tres categorías, perfectamente diferenciadas, a saber:

- a) Cambios en valor deseado de la variable controlada. Suelen ser llamados *cambios del punto de consigna (valor deseado)*.
- b) Cambios debidos a exigencias o condiciones específicas del proceso que, sin afectar al punto de consigna, modifican alguna de sus variables principales; es decir, son alteraciones en el flujo de energía (o material) de entrada o salida del proceso, relacionadas directamente con el mismo. Son los llamados *cambios de carga*.
- c) Cambios producidos por alteraciones ajenas a las exigencias del proceso y, en muchos casos, de origen externo al mismo. Este tipo de cambios son denominados *perturbaciones*. No obstante, cualquiera de los tres casos puede ser denominado, genéricamente, con esta misma expresión.

Los de la primera categoría no merecen apenas comentario; son debidas a necesidades específicas de operación, al precisarse un cambio en el valor de la variable controlada.

En nuestro ejemplo del horno, pertenecería a la segunda categoría un cambio en el caudal del producto circulante. Es evidente que un aumento en la demanda de dicho caudal tenderá a producir, en principio, un enfriamiento que será mostrado por el medidor de temperatura instalado a la salida del horno. Es un caso claro de cambio de carga del sistema.

A la tercera categoría pertenecerían, por ejemplo, un cambio en la presión o en la calidad del combustible, o un cambio en la temperatura ambiente. Serían perturbaciones al proceso.

La distinción entre la segunda y la tercera categoría no siempre es evidente y puede ser muy sutil. Por ejemplo, una alteración en la temperatura de entrada del producto será del tipo cambio de carga, si las condiciones normales del proceso son las de caudal constante y temperatura de entrada variable, que es precisamente la que se quiere controlar a la salida. Por el contrario, si las condiciones normales de operación son de caudal variable y temperatura de entrada constante, entonces la alteración de esta temperatura corresponderá a una perturbación. No obstante, no es tan importante la distinción en sí, sino más bien su evaluación, debido a que, en cualquier caso, produce efectos perniciosos sobre la controlabilidad y comportamiento del proceso, por lo que puede ser necesario, en algunos casos, un diseño especial del sistema de control que evite o minimice estos efectos.

1.9 Realimentación

Los cambios citados en el apartado anterior, acontecen constantemente, en mayor o menor grado, causando, según se ha dicho, alteraciones en la variable controlada, como consecuencia de los desequilibrios producidos en los balances energéticos, másicos, químicos, dinámicos, etc.

En el control automático en lazo cerrado, las diferentes etapas de que se compone una acción correctora pueden enumerarse como sigue:

- a) Medición de la *variable controlada* y transmisión de la *señal de medida* al *controlador*. Esta misión es llevada a cabo por el *transmisor*, el cual incluye o tiene asociado el *elemento primario* o *sensor* del proceso.
- b) Comparación entre el valor del *punto de consigna* prefijado (*valor deseado* o *set point*) y la *señal de medida*, efectuando la diferencia entre ambos para establecer la denominada *señal de error* o *desviación*. La lleva a cabo el dispositivo *comparador*, y suele estar contenido en el propio controlador.

- c) Partiendo de la *señal de error*, el *controlador* elabora su *señal de salida* o *señal de control*, de acuerdo con determinado algoritmo o ecuación. El controlador analiza la señal de error, teniendo en cuenta su *signo*, *magnitud*, *duración* y *tendencia* o velocidad de cambio.
- d) La señal de salida del controlador es conducida al *elemento final de control* o *regulación*, por lo general una *válvula de control*, que efectuará la correspondiente corrección en la *variable manipulada* de entrada al proceso.
- e) Reacción del *proceso*, con la consiguiente modificación del valor de la *variable controlada*, acercándose o igualando al *punto de consigna*.
- f) Nueva señal de medida, según la etapa a), con lo que se cierra el circuito.

Cualquier perturbación que se introduzca en algún punto del circuito (lo que sucede principalmente en el proceso), acabará afectando a la variable controlada y, por tanto, será detectada por el medidor (transmisor), entrando en la secuencia de corrección.

Esta secuencia se ejecuta simultáneamente en todo el circuito y su acción es continua en el tiempo, tendiendo a restablecer las condiciones de regulación deseadas, esto es, a igualar la medida con la consigna, anulando la señal de error.

Es importante notar que en esta serie de acciones concatenadas, hay un flujo de señales que están circulando constantemente desde la salida del proceso hacia su entrada, a través del sistema de medida, del controlador y del elemento final de control (véase la figura 1.3). A este fenómeno de “circulación hacia atrás” del flujo de información y de acciones se le llama *realimentación*; es el denominado *feedback* en inglés. Los efectos de esta realimentación fluyen hacia delante, a través del controlador, de la válvula y del proceso, para así cerrar el circuito del flujo de señales, con lo que se establece un anillo o *lazo cerrado* de causas y efectos. Otras posibles denominaciones, menos usuales, son *retroalimentación* y *retroacción*.

1.10 Álgebra de bloques

Dada la importancia que tendrá en futuros capítulos el planteamiento de los sistemas de control mediante diagramas de bloques, a continuación estudiaremos las reglas que rigen la manipulación y transformación de estos diagramas.

Las reglas aquí indicadas son válidas siempre que se trate de elementos lineales. Si la transmitancia de un bloque no es lineal, es posible, en general, linealizar su función en el punto de trabajo, lo que resulta una buena aproximación a efectos de llevar a cabo cualquier análisis del sistema. Sin embargo, para ello habrá que tener en cuenta determinadas consideraciones que serán vistas más adelante.

Las variables se representarán con letras minúsculas, mientras que las mayúsculas significarán las transmitancias de los bloques.

Debe recordarse que la transmitancia de un bloque es siempre la relación entre las señales de salida y entrada, por lo que si llamamos G a la transmitancia de un bloque, x a su entrada, e y a su salida, podrá escribirse

$$G = \frac{y}{x} ; \quad y = Gx$$

En todo momento podrán aplicarse las leyes conmutativas, asociativas y distributivas, igualmente válidas en álgebra de bloques. De hecho, las reglas del Álgebra de bloques se basan en estas leyes, que podemos resumir así:

$$GF = FG$$

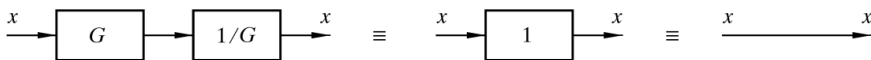
$$G + F = F + G$$

$$Gx + Gy = G(x + y)$$

$$Gx + Fx = (G + F)x$$

$$x - y = x + (-y) = x - (+y)$$

Por otra parte, un bloque con ganancia unitaria puede siempre ser suprimido, dejando solamente la línea de flujo. Así, por ejemplo, se podría efectuar la siguiente simplificación:

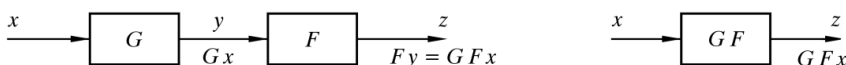


1.10.1 Reglas algebraicas

Las principales reglas algebraicas son las siguientes:

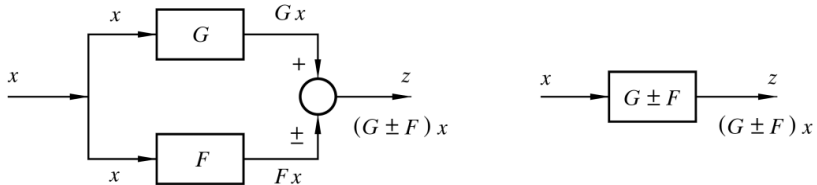
- a)** Bloques en serie. Pueden ser sustituidos por un único bloque, cuya transmitancia sea el producto de las transmitancias de cada bloque.

$$y = Gx ; \quad z = Fy ; \quad z = GFx$$



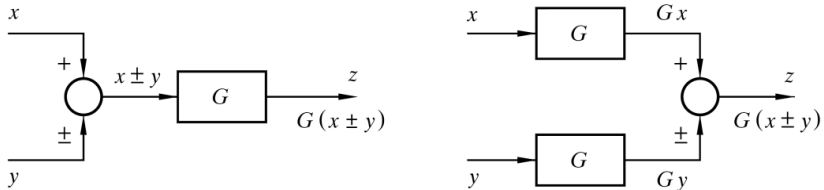
b) Bloques en paralelo. Su equivalente será un bloque con una transmitancia igual a la suma de transmitancias.

$$z = Gx \pm Fx = (G \pm F)x$$



c) Desplazamiento de un punto de suma detrás de un bloque.

$$z = (x \pm y)G = Gx \pm Gy$$

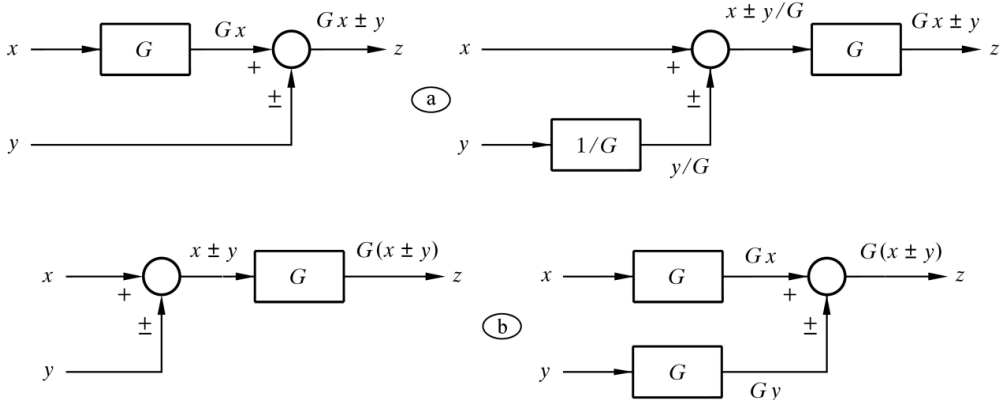


d) (a) Desplazamiento de un bloque detrás de un punto de suma.

$$z = Gx \pm y ; \quad (x \pm y/G)G = Gx \pm y$$

(b) Desplazamiento de un bloque delante de un punto de suma.

$$z = G(x \pm y) ; \quad Gx \pm Gy = G(x \pm y)$$

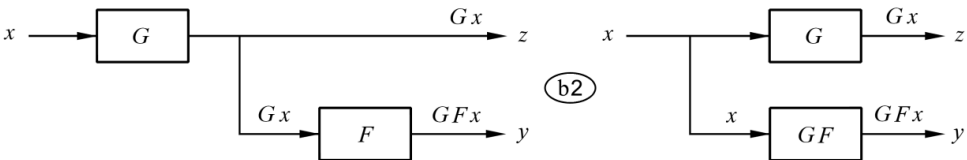
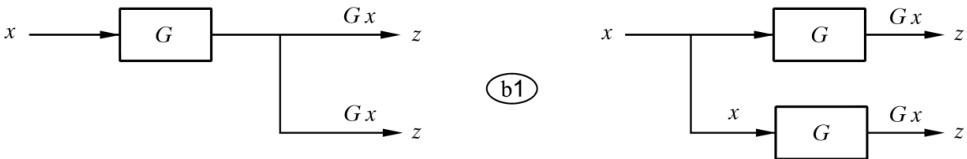
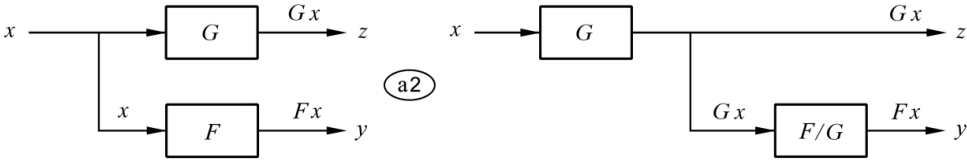
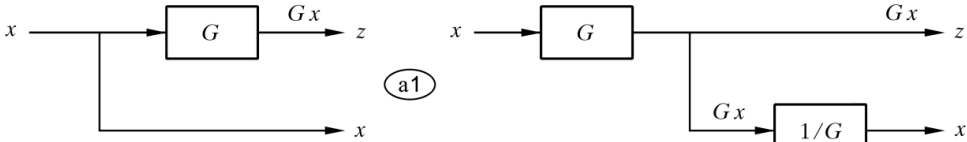


e) (a1/a2) Desplazamiento de un punto de derivación detrás de un bloque.

$$z = Gx ; \quad Gx(1/G) = x ; \quad y = Fx ; \quad Gx(F/G) = y$$

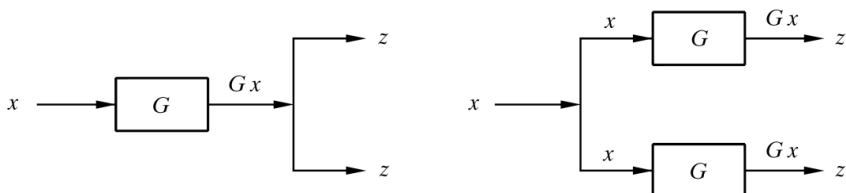
(b1/b2) Desplazamiento de un punto de derivación delante de un bloque.

$$z = Gx ; \quad y = GFx$$



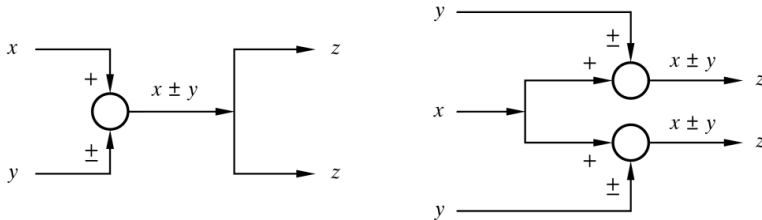
f) Desplazamiento de un bloque detrás de un punto de derivación.

$$z = Gx$$



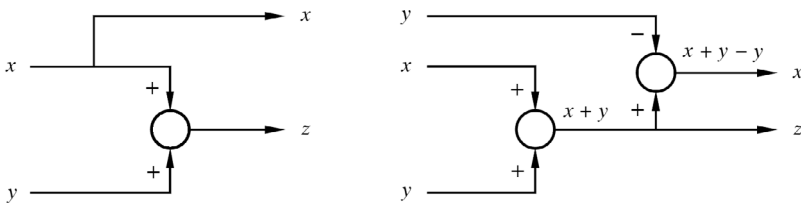
g) Desplazamiento de un punto de suma detrás de un punto de derivación.

$$z = x \pm y$$



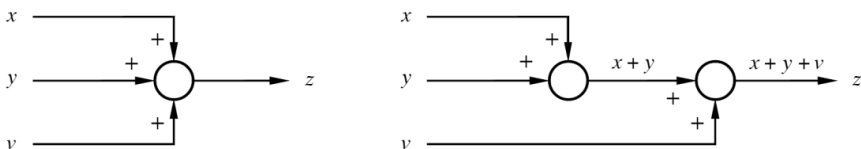
h) Desplazamiento de una derivación detrás de un punto de suma.

$$z = x + y ; \quad x + y - y = x$$



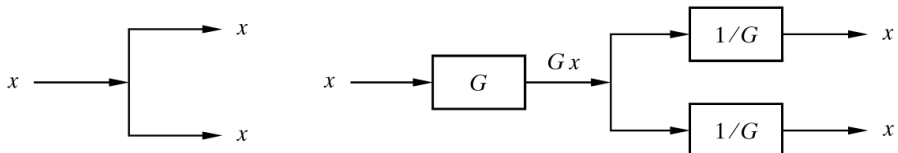
i) Desdoblamiento de puntos de suma de múltiples entradas.
Reagrupamiento de múltiples entradas en un solo punto de suma.

$$z = x + y + v$$



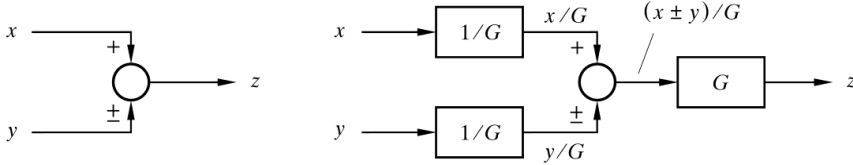
j) Inserción de un bloque delante de un punto de derivación.

$$x G \frac{1}{G} = x$$



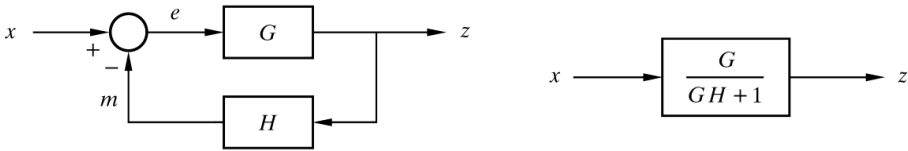
k) Inserción de un bloque detrás de un punto de suma.

$$z = x \pm y ; \quad (x \pm y)/G(G) = x \pm y = z$$



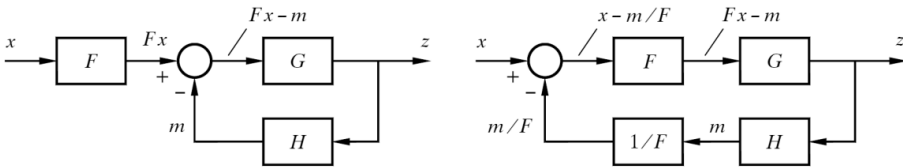
l) Transformación de un lazo sencillo de realimentación en un bloque único.

$$z = Ge ; \quad e = x - m ; \quad m = Hz ; \quad z = x \frac{G}{GH + 1}$$



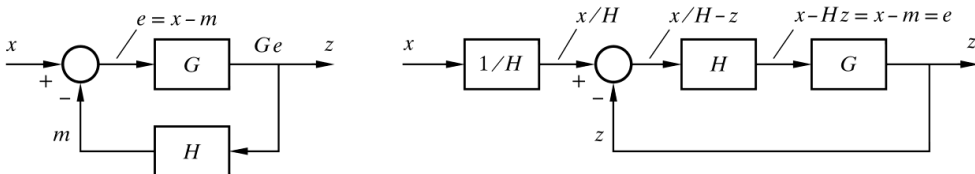
m) Traslación de un bloque dentro de un lazo de realimentación.

$$z = G(Fx - m) ; \quad m = Hz ; \quad z = x \frac{FG}{GH + 1}$$



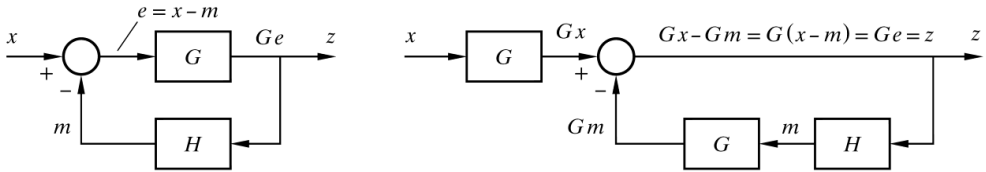
n) Extracción de un bloque de realimentación del interior de un lazo de realimentación.

$$e = x - m ; \quad m = Hz ; \quad z = Ge ; \quad z = x \frac{G}{FH + 1}$$



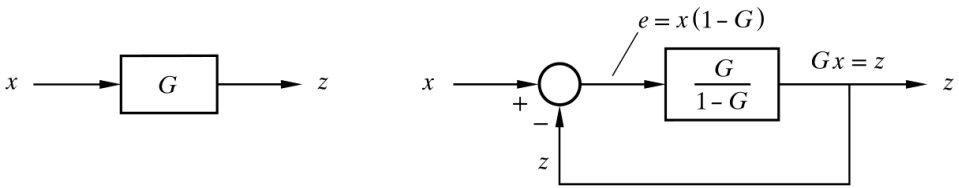
o) Extracción de un bloque de avance del interior de un lazo de realimentación.

$$e = x - m ; \quad m = Hz ; \quad z = Ge ; \quad z = x \frac{G}{FH + 1}$$



p) Transformación de un bloque en un lazo con realimentación unitaria.

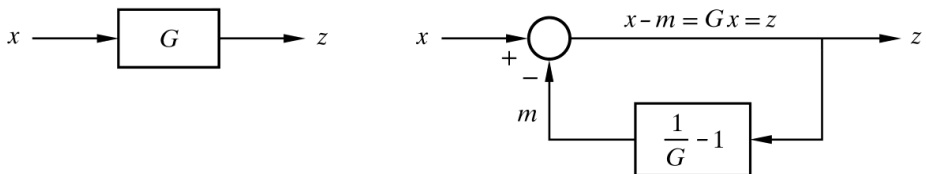
$$z = Gx ; \quad e = x - z = x - Gx = x(1 - G)$$



q) Transformación de un bloque en un lazo con avance unitario.

$$z = Gx ; \quad m = z \left(\frac{1}{G} - 1 \right)$$

$$x - m = x - Gx \left(\frac{1}{G} - 1 \right) = x - x + Gx = z$$



...

r) Cambio de signo en bloques y puntos de suma (tres ejemplos).

$$z = Fx + Gy + v = -(-F)x - (-1G)y - (-1)v$$

